

УДК 551.46.09: 504.42.054

## АНАЛИЗ РИСКА ДЛЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПРИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВАХ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Мохсен АбдульхакиМ Мохсен Ахмед, ФрумИн Г.Т.

*Российский государственный гидрометеорологический университет,  
Санкт-Петербург, Россия*

**В статье рассмотрены пять основных аспектов, связанные с рисками нефтяных разливов при авариях танкеров. Эти аспекты следующие: математико-статистический, физико-химический, токсикологический, экологотоксикологический, ущерб. Для оценки риска использовано следующее выражение:  $R = P \cdot U$ , где  $R$  - риск,  $P$  - вероятность появления нефтяных пятен (вероятность опасности),  $U$  - финансовый ущерб. Приведены аналитические выражения для расчетов рисков разливов нефти и нефтепродуктов при возможных авариях на акваториях Балтийского, Белого, Баренцевого и Японского морей.**

**Ключевые слова: риск, аварии танкеров, разливы нефти, ущерб.**

### Введение

В мировом энергобалансе доля нефти составляет 40%, угля – 27%, природного газа – 23%, ядерного топлива – 7,5% и гидроэнергии – 2,5%. Запасы сырой нефти и ежегодная добыча ее распределены по территориям разных стран неравномерно, что обуславливает необходимость транспортировки ее из одних стран в другие. Транспортировка половины добываемой на мировом шельфе нефти обеспечивается танкерным флотом. Транспортировка на танкерах оценивается в 1,5 млрд. тонн в год. Неизбежным спутником любых танкерных операций были и продолжают оставаться аварии [3, 6, 11]. Несмотря на явную тенденцию к снижению аварийности нефтеналивного танкерного флота, аварии танкеров до сих пор остаются одним из основных источников экологического риска [1].

По классификации Международной федерации владельцев танкеров, нефтяные разливы принято делить на три категории в зависимости от объемов утечки нефти: малые – менее 7 т, средние – от 7 до 700 т и большие – более 700 т.

Только в Балтийском море в среднем происходит 2,9 крупных аварий в год, сопровождающихся разливами нефти и нефтепродуктов. Статистический анализ показывает, что из 39 аварий, сопровождавшихся разливами нефти в Балтийском море с 1969 г. по 1995 г., 20 аварий (51,3%) произошли на акватории Швеции, 10 аварий (25,6%) – на акватории Дании, 7 аварий (17,9%) – на акватории Финляндии и по одной аварии (2,6%) – на акваториях Латвии и Литвы.

Увеличение масштабов добычи нефти, интенсификация перевозок нефти и нефтепродуктов, строительство и эксплуатация новых транспортных коридоров приведут к повышению опасностей (рисков) аварийных ситуаций. Поэтому обеспечение безопасности транспортных коридоров является задачей первостепенной важности. Для успешного решения этой задачи необходимо создание активно взаимодействующих систем, выполняющих следующие функции: \*прогноз опасностей и их проявлений;\* обеспечение техники безопасности (систем защиты); \*мониторинг окружающей среды и опера-

тивное оповещение; \*чрезвычайное реагирование при возникновении аварии. В данной функциональной последовательности начальным звеном, определяющим функционирование остальных систем, является система прогнозирования, осуществляющая анализ, оценку и управление рисками аварийных ситуаций. Риск  $R$  может быть определен как проявление вероятности опасности рассматриваемого события или процесса  $P$  на магнитуду ожидаемых последствий (ущерба)  $У$ :

$$R = P \times У \quad (1)$$

При анализе опасностей аварийных ситуаций, сопровождающихся разливами нефти и нефтепродуктов, необходимо учитывать, по крайней мере в первом приближении, пять основных аспектов (математико-статистический, физико-химический, токсикологический, экологотоксикологический, ущерб). Величины опасностей тесно связаны также с количе-

ством разлитых веществ, режимом сброса (одномоментный или продолжительный), гидрометеорологическими условиями, морфометрией акватории и видами населяющих ее гидробионтов.

Цель данного исследования заключалась в разработке теоретико-методических основ комплексной оценки риска для водных экосистем при аварийных разливах нефти и нефтепродуктов.

**Математико-статистический аспект анализа риска** предусматривает оценку вероятности возникновения аварии на транспортном коридоре и позволяет установить причины случившегося и направить усилия науки и практики для решения проблем и задач для снижения и исключения аварий и гибели судов. По данным литературы о причинах аварий 452 нефтеналивных судов [3] нами были рассчитаны доли аварий ( $p_i$ ) в зависимости от их причин, которые были нами ранжированы (таблица 1).

**Таблица 1.** Распределение аварий нефтеналивных судов по причинам

Причины аварии	Ранг ( $r$ )	Доля аварий ( $p_i$ )	Причины аварии	Ранг ( $r$ )	Доля аварий ( $p_i$ )
Столкновения	1	0,279	Взрывы	5	0,068
Посадка на мели (риффы)	2	0,272	Пожары	6	0,038
Несовершенство конструкции или навигационного оборудования	3	0,208	Поломки двигателя	7	0,033
Повреждения у причалов	4	0,101	-	-	-

Обработка данных таблицы 1 позволила выявить тесную корреляционную зависимость доли аварий от их ранга:

$$\ln(p_i) = -0,798 - 1,198 \times \ln(r) \quad (2)$$

$N = 7$ ;  $R^2 = 0,826$ ;  $\sigma_{Y(X)} = 0,412$ ;  $F_P = 23,75$ ;  $F_T = 5,99$

Здесь  $N$  – количество значений функции,  $R^2$  – коэффициент детерминации (объяснимая доля разброса),  $\sigma_{Y(X)}$  – стандартная ошибка,  $F_P$  и  $F_T$  – расчетное и

табличное (для  $\alpha = 95\%$ ) значения критерия Фишера.

**Физико-химический аспект анализа рисков** предусматривает наличие информации о химических, физико-химических и биохимических свойствах компонентов нефти и нефтепродуктов. Для оценки нефти как загрязняющего вещества природной среды обычно используют следующие признаки: содержание легких фракций (температура кипения менее

200<sup>0</sup>С); содержание парафинов; содержание серы. Установлено, что на нефтяные разливы приходится 20–30% общего загрязнения. При попадании нефти в море на поверхности воды образуется пленка – «нефтяной слик». Толщина этой пленки может быть различной: от мономолекулярной до нескольких сантиметров. При попадании в морскую среду нефть сначала растекается в виде пленки, образуя слой различной толщины. По цвету пленки можно определить ее толщину. Нами было выявлено следующее уравнение, связывающее количество растекшейся по водной поверхности нефти ( $q$ , л.км<sup>-2</sup>) с толщиной пленки ( $h$ , мкм)

$$q = 4 + 1137 \times h \quad (3)$$

В нефтяной пленке нередко аккумулируются ионы тяжелых металлов и хлорированные углеводороды. Обширные акватории океана, особенно вдоль транспортных (танкерных) маршрутов, постоянно покрыты нефтяными пленками, а поверхностный микрослой загрязнен нефтяными агрегатами. В условиях интенсивного антропогенного воздействия возникает качественно новая форма существования загрязняющих веществ в водной среде, связанная с эффектом так называемого «перераспределения». Этот эффект обусловлен присутствием в воде поверхностно-активных веществ и заключается в переходе загрязняющих веществ из объемной фазы на поверхность с последующим формированием пленки микроскопической толщины, характеризующейся чрезвычайно высоким содержанием микроорганизмов и химических веществ. Такой микрослой может фиксировать до 80% от общего количества химических веществ и патогенных бактерий и вирусов, присутствующих в объемной водной фазе. Содержание их в адсорбционной пленке в тысячи раз превышает допустимое [4]. Особенно опасны попадания больших объемов нефти в воды высоких широт. При низких температурах разложение

нефти идет медленно и нефть, сброшенная в арктические моря, может сохраняться до 50 лет, нарушая нормальную жизнедеятельность водных биоценозов. Наиболее существенными физико-химическими показателями, определяющими поведение нефтяных углеводородов в воде, являются интенсивность испарения из воды и растворение в воде. Летучесть химического соединения, зависящая от упругости его паров, определяет один из главных источников поступления в атмосферу и может приводить к его распространению на больших территориях. Важной физико-химической характеристикой химических веществ является также коэффициент их распределения в системе н-октанол-вода ( $K_{OW}$ ). Этот коэффициент представляет собой отношение концентрации вещества в н-октаноле (модель липидной фазы) к концентрации в воде. Величина  $K_{OW}$  обычно используется для предсказания сорбции вещества в почве, донных отложениях и биоаккумуляции. Между  $K_{OW}$  и растворимостью вещества в воде ( $S$ , мг/л) существует зависимость, которая выражается уравнение [10]

$$\lg K_{OW} = 4,6785 - 1,086 \lg S \quad (4)$$

Согласно теории Фэя [2], растекание нефти происходит в три стадии. На начальной стадии важны силы гравитации и инерции, на второй стадии превалируют силы гравитации и вязкости, на третьей стадии растекание происходит под действием сил межфазного поверхностного натяжения. В итоге максимальная площадь пятна ( $S$ , м<sup>2</sup>) не может превышать следующее значение

$$S = 10^5 \times V^{3/4}, \quad (5)$$

где  $V$  – начальный объем разлива, м<sup>3</sup>.

**Токсикологический аспект анализа рисков** предусматривает наличие информации о токсичности компонентов нефти и нефтепродуктов для различных видов гидробионтов. Индивидуальные нефтяные углеводороды сильно различаются по

своим токсическим свойствам. К сожалению, данные о токсичности нефтяных углеводородов для различных видов гидробионтов, включая ценные породы рыб, весьма ограничены. Однако в любом случае следует учитывать, что в гомологических рядах соединений выполняется так называемый «закон перелома». Суть его в том, что по мере увеличения в гомологическом ряду соединений количества атомов углерода токсичность (величина обратной средней летальной или эффективной концентрации) возрастает, достигает максимального значения, а затем уменьшается. «Перелом» зависит от исследуемого токсического эффекта. Чем грубее эффект, тем скорее в гомологическом ряду достигается последний эффективный член, обладающий наибольшей токсичностью. «Перелом» имеет общепризнанное биологическое значение и является одной из предпосылок возможности существования жизни [7]. Он обусловлен тем, что физико-химические свойства токсичных веществ, непосредственно связанные с токсическим действием (например, давление паров при токсическом эффекте), изменяются в гомологическом ряду веществ с иной скоростью, чем родственные им константные свойства (например, упругость пара). Для оценки опасности различных углеводородов в отношении различных видов гидробионтов может быть

использована линейно-экспоненциальная модель вида

$$\ln[-\ln(1-P)] = a + b \ln C, \quad (6)$$

где  $P$  – вероятность летального или иного токсического эффекта (опасность),  $C$  – концентрация загрязняющего вещества.

**Эколого-токсикологический аспект анализа рисков** предполагает оценку опасности не для отдельных особей или популяций гидробионтов, а для гидрэкосистемы, подвергнувшейся воздействию нефти и нефтепродуктов в результате аварии. Необходимость такой оценки весьма очевидна, так как жертвами разливов нефти и нефтепродуктов становятся многие гидробионты и даже птицы. Так, в районе Британских островов ежегодно жертвами аварий танкеров оказываются от 50 до 250 тыс. морских птиц.

В обнаружении и оценке риска (опасности) большую роль играет моделирование поведения химикатов в окружающей среде и экспериментальное выявление их токсических свойств по отношению к различным звеньям экосистем. Возможные подходы к решению этой задачи рассмотрены в работе [5].

Известно несколько вариантов аналитической зависимости между действующим внешним воздействием  $R$  на систему и реакцией системы  $E$  на это воздействие (таблица 2).

**Таблица 2.** Аналитические выражения зависимостей реакций экосистем ( $E$ ) на внешнее воздействие ( $R$ ) [9]

Закон	Аналитическое выражение
Вебера-Фехнера	$E = C \times \lg(R/R_n)$
Стивенса	$\ln E = k \times \ln R$
Забродина	$dE/E^z = h \times dR/R$
$E$ -функции	$E = C \times R^a \times (-\ln R)^b$

Примечание.  $R_{II}$  – некоторое пороговое воздействие, при котором система начинает реагировать на воздействие,  $C, k, z, h, a, b$  – константы, характеризующие специфику исследуемой системы.

**Оценка ущерба** представляет собой сложную многокритериальную задачу. Для оценок ущербов можно воспользоваться рекомендациями, изложенными в [8]. Согласно этой методике, для исчисления размера вреда (штрафа) необходимы данные о количестве нефти (нефтепродуктов), поступивших в водную среду (в тоннах), природно-климатических условиях (времени года), длительности негативного воздействия - времени неприменения мер (в часах) по ликвидации загряз-

нения водного объекта и экологических факторах, то есть о водном объекте, где произошел разлив. Для иллюстрации нами были определены размеры вреда при разливах нефти (нефтепродуктов) по акваториям нескольких морей. Расчеты проведены для следующих условий: объем разлива (600-750 тонн, зимний сезон – декабрь, январь, февраль, длительность негативного воздействия – до 6 часов) (таблица 3).

**Таблица 3.** Размер вреда (ущерб) при аварийных разливах нефти (нефтепродуктов)

Море	Размер вреда, млн. рубл.	Море	Размер вреда, млн. рубл.	Море	Размер вреда, млн. рубл.
Азовское	602,46	Белое	506,06	Черное	506,06
Каспийское	602,46	Баренцево	506,06	Карское	491,6
Балтийское	506,06	Японское	506,06	Чукотское	481,97

**Расчет риска.** По оценкам специалистов общая вероятность аварии равна 0,4 на 1000 рейсов танкеров. Опасность риска разлива принимается равной 0,05 на 1000 рейсов в открытом море и 0,25 в опасных местах. С учетом вероятной частоты аварии с посадкой на мель и столкновением средний размер нефтяного разлива может быть оценен как 1/48 от количества перевозимой за рейс нефти (данные заимствованы из интернет-сайта,

e-mail: wlf@newsru.com). Учитывая, что риск рассматривается как произведение опасности на ущерб и принимая наиболее жесткий вариант (опасность равна 0,25), нами были выявлены формулы для ориентировочных расчетов рисков разливов нефти и нефтепродуктов при потенциально возможных авариях на 1000 рейсов в Балтийском, Белом, Баренцевом и Японском морях при длительности негативного воздействия 6 часов (таблица 4).

**Таблица 4.** Формулы для расчетов рисков разливов нефти и нефтепродуктов при возможных авариях на акваториях Балтийского, Белого, Баренцевого и Японского морей (на 1000 рейсов)

Время года	Аналитическое выражение
Зима (декабрь, январь, февраль)	Риск = $0,30 \times Q - 0,9$
Весна (март, апрель, май)	Риск = $0,26 \times Q - 0,9$
Лето (июнь, июль, август)	Риск = $0,31 \times Q - 0,9$
Осень (сентябрь, октябрь, ноябрь)	Риск = $0,30 \times Q - 0,9$

Примечание. Q – количество разлитой нефти (нефтепродуктов), тонн

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Алхименко А.П., Цветков В.Ю. Масштабы воздействий аварийных нефтеразливов в водной среде «Ладожское озеро – река Нева – Финский залив» // Тез. докл. IV Международного экологического форума «День Балтийского моря». СПб.: СПБОО «Экология и бизнес». 2003. – С. 96-97.
2. Архипов Б.В., Пархоменко В.П., Солбаков В.В., Шапочкин Д.А. Математическое моделирование распространения нефтяных разливов в морской среде. М.: ВЦ РАН. 2001. – 55 с.
3. Герлах С.А. Загрязнение морей. Л.: Гидрометеиздат. 1985. – 264 с.
4. Ильин И.Е. Изучение опасности перераспределения загрязнителей химической и биологической природы в водной среде // Гигиена и санитария. 1986. №6. – С.8-11.
5. Исидоров В.А. Введение в химическую экотоксикологию: Учебное пособие. СПб.: Химиздат. 1999. – 144 с.
6. Кацман Ф.М., Ершов А.А. Аварийность морского флота и проблемы безопасности судоходства // Транспорт Российской Федерации. №5, 2006. – С. 82-84.
7. Лазарев Н.В. Неэлектролиты. Опыт биолого-физико-химической их систематики. Л.: Военно-медицинская академия. 1944.- 272 с.
8. Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства. Утверждена Министерством природных ресурсов РФ. Приказ №71 от 30 марта 2007 года.
9. Никаноров А.М., Пантюхин Я.В., Заволжский М.В., Коханая С.И. Адаптационные характеристики водных экологических систем. В кн.: «Экологическое нормирование и моделирование антропогенного воздействия на водные экосистемы». Вып. 2. СПб.: Гидрометеиздат. 1999. – С. 6-54.
10. Фрумин Г.Т. Экологическая химия и экологическая токсикология: Учебное пособие. – СПб.: РГГМУ. 2002. – 204 с.
11. Щеголев В.И. Типичные аварийные случаи с морскими судами. СПб.: ЗАО ЦНИИМФ. 1994. – 144 с.

## THE ANALYSIS OF RISK FOR WATER ECOSYSTEMS AT EMERGENCY SPILLS OF OIL AND OIL PRODUCTS

Mokhsen Abdulkhakim Mokhsen Akhmed, Frumin G.T.  
*Russian State Hydrometeorological University,  
 St-Petersburg, Russia*

In this research five basic aspects linked to risks of oil spills at failures of tankers are described. They are mathematical-statistical aspect, physical-chemical aspect, toxicological aspect, ecotoxicological aspect and financial injury. For an estimation of risk the following expression has been used

$$Risk = P \cdot FI$$

Where *Risk* is risk value, *P* is the probability of oil spills incidents, *FI* – financial injury. For some water objects (the Baltic Sea, the White Sea, the Barents Sea and the Sea of Japan) the formulas for calculations of “Risk” have been indicated.

Key words: risk, failures of tankers, oil spills, damage.